

耐塩害性地盤構造及び塩害地盤浄化手法の検討

Study of the stratigraphic architecture resistant for salt damage and the method to purify salty ground

河井克之¹・野村瞬²・大野進太郎³・Thirapong Pipatpongsa⁴・橋伸也⁵・金澤伸一⁶・飯塚敦⁷
Katsuyuki KAWAI, Shun NOMURA, Shintaro OHNO, Pipatpongsa THIRAPONG,
Shinya TACHIBANA, Shinichi KANAZAWA and Atsushi IIZUKA¹ 工博, 神戸大学助教, 都市安全研究センター (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)² 工学士, 神戸大学大学院工学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)³ 工博, 鹿島建設(株), 土木設計本部 (〒107-0052 東京都港区赤坂 6-5-30)⁴ 工博, 東京工業大学准教授, 学術国際情報センター (〒152-0033 東京都目黒区大岡山 2-12-1)⁵ 工博, 埼玉大学助教, 地圏科学研究センター (〒338-8570 さいたま市桜区下大久保 255)⁶ 工修, 神戸大学大学院工学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)⁷ 工博, 神戸大学教授, 都市安全研究センター (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

Recently, desertification has become a serious problem all over the world. It can be brought about by human activity while natural conditions, such as climatically, topographically, and so on, strongly influences on desertification. These factors for desertification interact complicatedly and a large number of studies have been made on up to now. Salt damage is one of the serious factors for desertification. It is the phenomenon that salt solution within groundwater concentrates to the ground surface due to too much cultivation, irrigation, and so on and farmland is deserted. In this study, the mechanism of salt damage is studied with unsaturated soil/water coupled simulation considering material transportation with in water. Moreover, the stratification resistant to salt damage and flashing method to purify salt-damaged ground is examined. Consequently, it is found that two stratifications, namely mulching and improved mulching, are proposed and flashing in dry season is relatively effective.

Key Words : salt damage, unsaturated soil, numerical analysis

1 はじめに

現在, 世界規模で沙漠化が深刻な環境問題となっており, 毎年 60,000km² もの速度で沙漠が拡大している。沙漠化の主要因のひとつである塩害は, 人為的もしくは自然的要因で地表面近くに塩類が集積し, 植物の生育が困難な土地劣化を生じさせる。タイ東北部では, 地下深部の高塩分濃度地下水を利用した, 天日乾燥による伝統的な製塩業が盛んである。しかしながら, 近年過剰に汲み上げられた塩分含有水が周辺地盤に漏出し, 人為的な塩害を生じているだけでなく, 塩田以外でも長期的な降雨・蒸発のサイクルの中で, 自然発生的に地表面にまで塩分が上昇し, 農作物の収穫に大きな影響を及ぼしている。図-1 は, タイ東北部のある河川敷の写真であり, 地表面の白い部分は塩分が析出している場所である。藤川ら¹⁾ は, 従来の不飽和土/水連成有限要素解析の枠組みに物質輸送方程式を組み込むことで, 地盤の変形も考慮に入れた移流分散問題として定式化を行い, 乾湿繰り返しによる塩類集積を表現することに成功して

いる。藤川らは, Karube and Kawai²⁾の不飽和土構成モデルを飯塚ら³⁾の手法で定式化したものを用いているが, 要求される土質パラメータの同定が困難で, 計算結果が敏感にパラメータに依存した結果, 解が不安定になる可能性があった。本研究では, パラメータ同定が簡易で, 実験結果を反映しやすい, 大野ら⁴⁾の不飽和土構成モデルを用い, 塩類集積シミュレーションを行う。また, 異種地盤材料の組み合わせ



図-1 自然発生の塩害

せによる耐塩害性地盤を提案するとともに、すでに塩類集積が生じた地盤の再生手法に関して検討を行う。

2 物質移動を考慮した不飽和土/水連成問題の定式化

塩害が問題となるのは、降水量の少ない乾燥地であり、地盤は不飽和状態である場合が主であるため、シミュレーションには、不飽和土の力学体系が必要となる。ここでは、本論文で用いた数理モデルを示す。

2.1 不飽和土構成モデル

降雨・蒸発といった水収支をシミュレーション内で表現すると、地盤の含水比変化によるサクシオン変化は水分特性曲線から得られることになるが、藤川らが用いた軽部らの構成モデルでは、解析結果の水分特性曲線の形状への感度が高いため、広範囲なサクシオン領域での計算が困難である。そこで、水分特性曲線を用いるものの、構成モデルのパラメータ同定にその形状が影響を及ぼさない大野らのモデルを用いる。

大野らは不飽和土の降伏関数が、有効応力と剛性に寄与するパラメータで与えられることを示し、剛性に寄与するパラメータとして有効飽和度を選定し、Cam-Clay モデルを拡張した不飽和土降伏関数を提案した。有効応力は、次式で与えられる。

$$\boldsymbol{\sigma}' = \boldsymbol{\sigma}^{net} + p_s \mathbf{1} \quad (1)$$

$$\text{ただし, } \boldsymbol{\sigma}^{net} = \boldsymbol{\sigma} - p_a \mathbf{1}, p_s = S_{re} s \quad (2)$$

$$s = p_a - p_w, S_{re} = \frac{S_r - S_{rc}}{1 - S_{rc}} \quad (3)$$

であり、 $\boldsymbol{\sigma}'$:不飽和土の有効応力テンソル、 $\boldsymbol{\sigma}^{net}$:ネット応力テンソル、 $\mathbf{1}$:2 階の単位テンソル、 $\boldsymbol{\sigma}$:全応力テンソル、 s :サクシオン、 p_s :サクシオン応力、 p_a :間隙空気圧、 p_w :間隙水圧、 S_r :飽和度、 S_{re} :有効飽和度、 S_{rc} :吸着水が占める飽和度である。

この有効応力を用いて、降伏関数を次のように表した。

$$f(\boldsymbol{\sigma}', \zeta, \varepsilon_v^p) = MD \ln \frac{p'}{\zeta p'_{sat}} + D \frac{q}{p'} - \varepsilon_v^p = 0 \quad (4)$$

$$p' = \frac{1}{3} \boldsymbol{\sigma}' : \mathbf{1}, q = \sqrt{\frac{3}{2}} \mathbf{s} : \mathbf{s}, \mathbf{s} = \boldsymbol{\sigma}' - p' \mathbf{1} = \mathbf{A} : \boldsymbol{\sigma}', \mathbf{A} = \mathbf{I} - \frac{1}{3} \mathbf{1} \otimes \mathbf{1}$$

\mathbf{I} : 4 階の単位テンソル

ここで、

$$\zeta = \exp[(1 - S_{re})^n \ln a] \quad (5)$$

であり、形状パラメータ n 、 a により、飽和状態における圧密降伏応力 p'_{sat} と任意の有効飽和度にお

ける圧密降伏応力の比として規定される。 M は、 q/p' で表された限界応力比、 D はダイラタンシー係数であり、

$$MD = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \quad (6)$$

で表される。 λ 、 κ はそれぞれ圧縮係数、膨張係数、 e_0 は初期間隙比、 ε_v^p は塑性体積ひずみである。図-2 に式(4)で表される不飽和土降伏曲面の概念図を示す。

2.2 浸透方程式および物質輸送方程式

藤川ら¹⁾は、土中水に溶解する物質相の質量保存則より次のような浸透方程式と物質輸送方程式を導いている。

$$\dot{\varepsilon}_v S_r - n_e \dot{S}_r - n_e S_r \frac{\gamma}{1 + \gamma c} \dot{c} - \nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (7)$$

$$-\dot{\varepsilon}_v S_r c + n_e \dot{S}_r c + n_e S_r \dot{c} + \nabla \cdot (\mathbf{v}c) + n_e S_r \nabla J = 0 \quad (8)$$

ここで、 ε_v は体積ひずみ、 n_e は間隙率、 γ は飽和溶解度、 c は濃度 ($0 \leq c \leq 1$: 飽和溶液濃度を $c=1$ として正規化)、 $\mathbf{v} = -\mathbf{k} \cdot \nabla h$ はダルシー流速、 \mathbf{k} は透水係数テンソル、 h は全水頭、 $\mathbf{J} = -\mathbf{D}^c \cdot \nabla c$ は Fick 則が示す濃度フラックス、 \mathbf{D}^c は分散係数テンソルである。この2式では、変形をひずみで一般化して表現することによって、不飽和地盤特有の変形挙動を表現する構成モデルの自由な選定を可能としている点に特徴がある。

3 塩類集積シミュレーション

前章で紹介した支配方程式を連成させた土/水連成有限要素解析コード DACSAR-Uad を用いて実際に塩害が起こっているタイ東北部の気候(降雨、蒸発)条件で、地盤の乾湿繰り返しシミュレーションを行い、塩分の上昇挙動を検討する。

3.1 解析条件

解析領域を図-3 に示す。なお、以下の図において解析領域下端から鉛直上向きに Y 軸 ($0.0\text{m} \leq Y \leq 4.0$

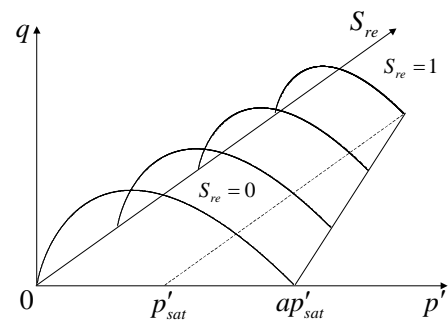


図-2 不飽和土の降伏曲面の概念図

m) を取る。下端に地下水位が来るように水頭境界を与え、左右端は非排水条件とした。上端は流量境界とし、図-4 に示すタイの首都バンコクの気候を想定した降雨量、可能蒸発量をそれぞれ下向き、上向き流量として与えた。実際の地表面からの蒸発量は、地盤の含水状態に依存するため、解析内では時々刻々と変化する地表面要素の有効飽和度を可能蒸発量に乗じたものが実蒸発量として計算されるようにしている。バンコクは亜熱帯性低気圧の影響を受け、1年を通して気温が26~30度と高く、季節的な気温の変化が少ない。またモンスーンが5月~9月にかけて卓越し、まとまった降雨をもたらす。雨季と乾季が明確な、半乾燥帯の気候条件を有する。解析領域下端の地下水は、濃度比 $C=0.03$ の塩類を含有しているものとし、 $C=0.03$ の物質境界を与えた。地下水位は、対象地域の日変動や季節変動を無視できるものとして一定とした。

地盤材料には、現地の地盤と同程度の保水性を有し、物性も近いと考えられる微細シルトを想定し、仮定の物性値を設定した。解析に用いた材料パラメータ

表-1 解析で用いた材料パラメータ(微細シルト)

λ	κ	M	ν	a	n	k (cm/s)	m
0.06	0.01	1.33	0.30	150	1.0	1.0×10^{-4}	0.3

m : Mualem⁷⁾の不飽和透水係数式のパラメータ

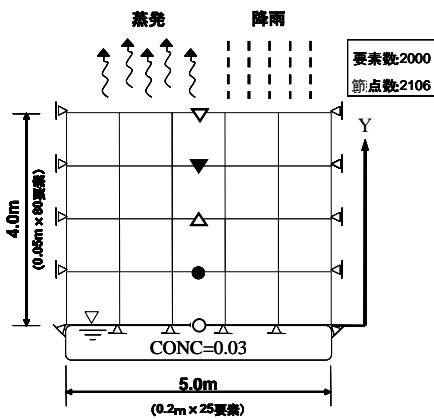


図-3 解析メッシュ・境界条件

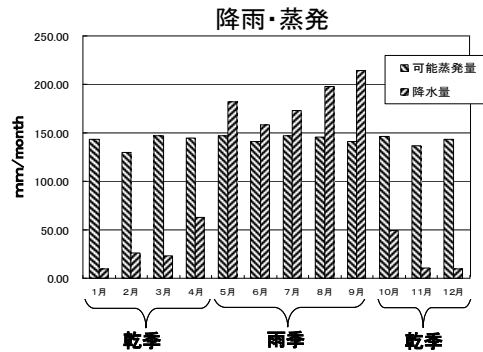


図-4 入力気候条件

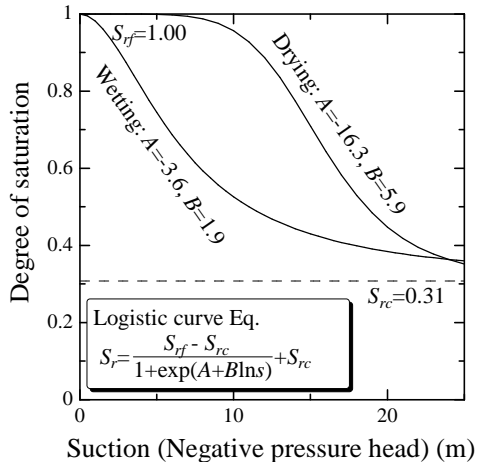


図-5 水分特性曲線(微細シルト)

を表-1 に、水分特性曲線を図-5 に示す。水分特性曲線モデルとして、杉井・宇野⁵⁾のロジスティック曲線式を用いて、ヒステリシスを表現した河井ら⁶⁾のモデルを用いた。また、地盤内では、地下水位からの高さ相当の負の水圧が作用しているとし、主脱水曲線、主吸水曲線の中間の飽和度を初期飽和度とした。

3.2 解析結果及び考察

図-6 に、解析開始後の地盤の塩分濃度分布を示す。時間経過とともに塩分が地表面方向へと移動しているのが確認できる。図-7 では地下水面からの高さ毎に塩分濃度の経時変化を比較している。地表面に近いほど、雨季乾季の繰り返しの影響が顕著に現れている。また、2年経過後には、地盤全体が初期地下水塩分濃度比($C=0.03$)に収束し、その後は地表面近傍から塩分濃度が上昇していき、時間経過による濃度蓄積を経て、3年目には飽和溶液濃度($C=1.00$)を越え、図-8 のように塩類析出が起こっていることがわかる(析出量比は飽和溶解度に対する析出量の

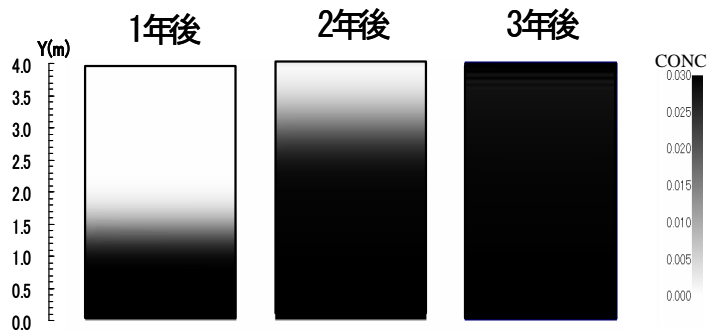


図-6 地盤内の塩分濃度分布

比). 図-9 に月毎の全水頭の深度分布を示す. 乾季, 雨季では, 流れの方向が逆転していることが分かる. また, 図-10 に示す地表面要素の水収支から, 蒸発による地盤からの水の流出が, 降雨による流入より卓越していることが分かる. 塩類の移動方向は, この地下水流向に依存するため, 地表面での塩類集積につながっている.

4 耐塩害性地盤構造の検討

前章に示したように, 一定濃度の塩分を有する地下水が存在する場合, 水収支から塩類集積が生じる. 本章では, 異なる保水性を持つ地盤材料の組み合わせによる, 水収支制御について検討を行う.

4.1 塩害抑制のための改良地盤

地表面からの蒸発量は土の乾燥度合いによって大きく異なる. 農学の分野では, このことを利用して, 比較的粒径の大きな材料を地表面に敷き均すマルチングという手法がよく用いられる. マルチングに用いられる材料は, 保水性が低いため, 実蒸発量を抑制することから, 地盤の乾燥を防ぐことができる. ここでは, このマルチングの効果をシミュレーションにより明らかにする. さらに, 改良型マルチングとして, 保水性の低い材料の上に植栽地盤を設けた場合を設定する(図-11). これらの2つの方法で, マルチングに用いる材料の厚さ, 深さに関する検討を行う. マルチング材料として, 微細シルトより透水性が高く保水性の低いケイ砂を想定し, 仮想の材料

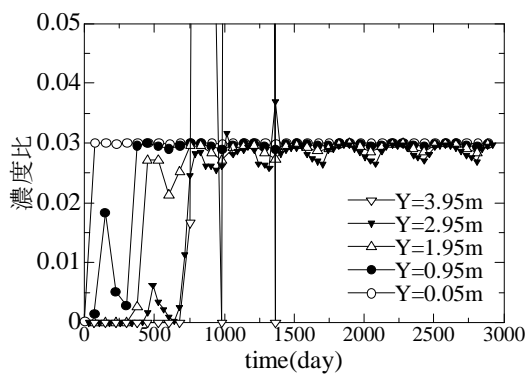


図-7 地下水面上高さ毎の塩分濃度変化

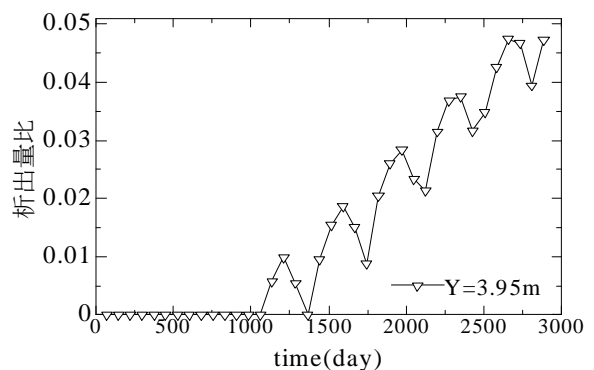


図-8 地表面塩分析出力

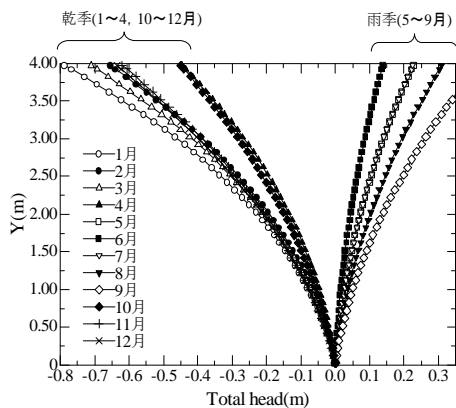


図-9 月毎の全水頭深度分布

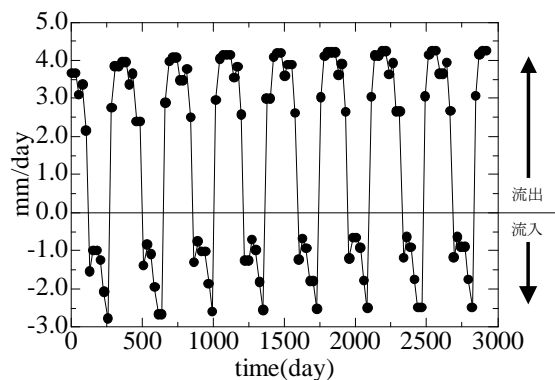


図-10 地盤の水収支

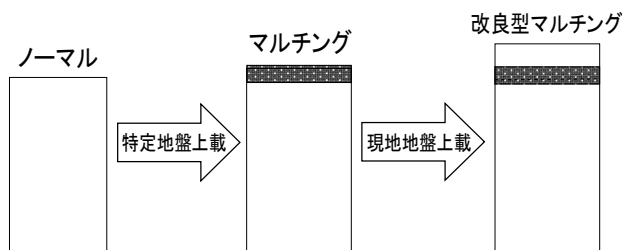


図-11 地盤改良の模式図

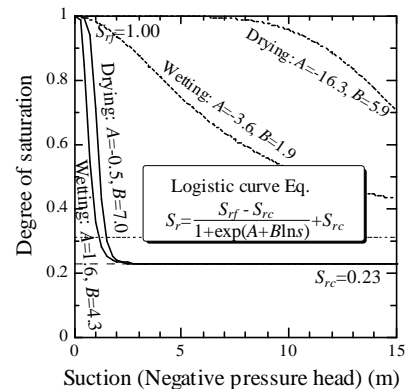


図-12 水分特性曲線(マルチング材料)

パラメータを設定した。図-12に、解析に用いるマルチング材料の水分特性曲線を示す。参考のため、微細シルトの水分特性性を点線で示している。また、表-2に材料パラメータを示す。

4.2 解析結果および考察

(1) マルチング

最初に想定するマルチング厚さを 50cm として塩害抑制効果の確認を行ったところ、地下水面から地盤上部へ向けての濃度上昇が見られず、塩害抑制効果があることが分かった。さらに上載するマルチング層を徐々に薄くしていき、10cm のマルチングであっても時間経過に伴う地盤内濃度上昇が見られず、塩害抑制に十分効果があることが確認できた(図-13)。図-14 に、地下水面からの高さ毎の濃度比変

化を示す。図から地下水面のすぐ上の要素(Y=0.05m)のみで濃度変化が起こり、上部の層では濃度変化が一切見られないことが分かる。また、Y=0.05mの層で見られる濃度変化は拡散によるものであり、蒸発の影響によるものではないため、深刻な塩害を起こし得ないと考える。

(2) 改良型マルチング

前述のようにマルチングにより塩害抑制効果が期待できることが分かった。しかしマルチング材料は保水性に乏しく、多くの水分量を保持できないため植栽に適さず、環境に与える負荷が大きい。そこで、塩害抑制効果と緑化を同時に期待できる地盤構成として改良型マルチングを考えた。タイの主農作物である、稲の根の平均生育長さが 50cm であることを

表-2 解析で用いた材料パラメータ(マルチング材料)

λ	κ	M	ν	a	n	k (cm/s)	m
0.06	0.01	1.33	0.30	150	1.0	8.0×10^{-4}	0.3

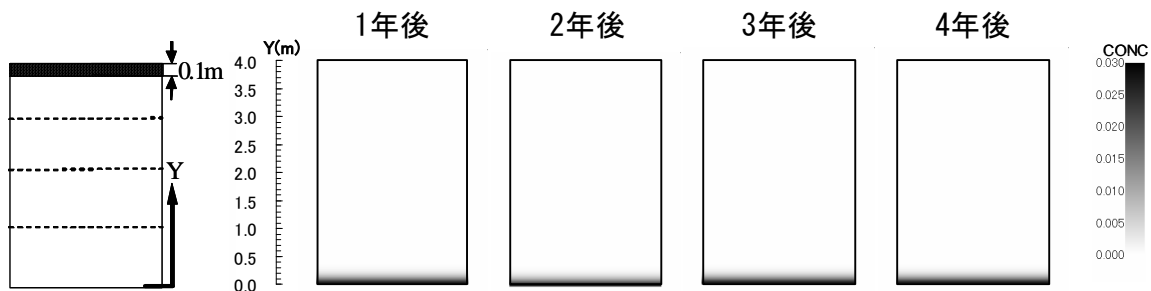


図-13 マルチング地盤の塩分濃度分布

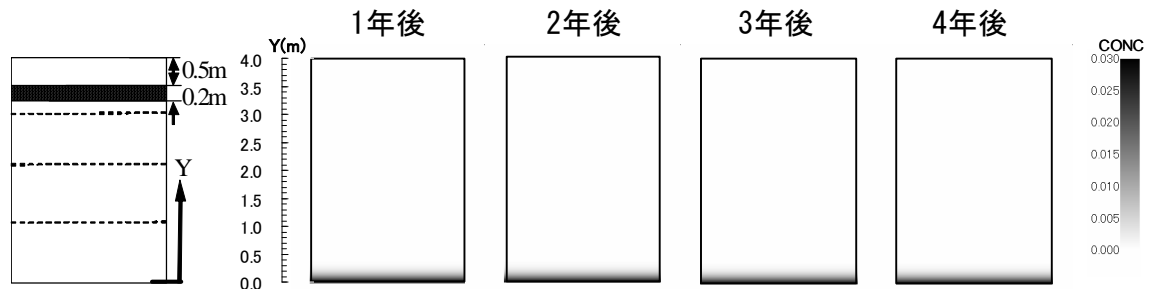


図-15 改良型マルチング地盤の塩分濃度分布

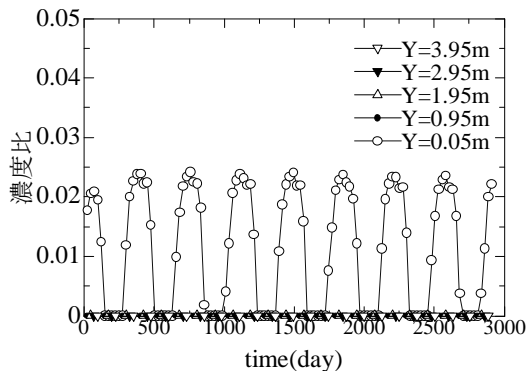


図-14 地下水面高さ毎の塩分濃度変化(マルチング)

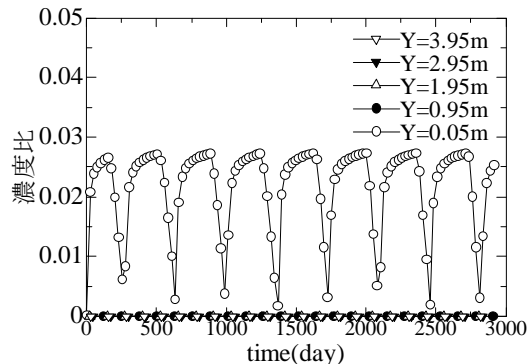


図-16 地下水面高さ毎の塩分濃度変化(改良型マルチング)

考慮し、マルチング層の上面を地下 50cm とし、その厚さを様々に変化させ、効果の確認を行った。

マルチングのケースと同様、層の厚さ 50cm から塩害抑制効果の検討を行った。その結果、20cm 厚のマルチング層を地盤内に設ければ、濃度上昇が起きず、塩害抑制に効果を発揮することが分かった(図-15)。図-16 にマルチング層厚 20cm での濃度比変化を示す。図から、マルチング同様、地下水面のすぐ上の要素でのみ拡散に伴う濃度変化が起こり、上部の層では濃度変化が一切見られないことが分かる。

マルチング、改良型マルチングとも塩害抑制に効果があることが確認できたが、そのメカニズムは異なる。図-17 は、マルチングを行わない場合と、マ

ルチングを行った場合の地表面要素の飽和度変化比較である。塩分上昇を生じた微細シルトでは、蒸発量が降雨量に勝っているにも拘らず高飽和度を保っているのに対して、マルチング材料の飽和度はかなり低い状態で推移している。これは、材料の保水性の違いに起因している。図-12 に示したように、同じサクション下では、マルチング材料の方が低飽和度であるのは明らかである。実蒸発量は地盤の含水量に大きく依存するため、低飽和度のマルチング材料では実蒸発量が大きく低下する。そのため、地盤からの水分流出よりも降雨による流入が勝り(図-18)、塩分は流下する(図-19)。一方、図-20 は、改良型マルチングを行った場合の全水頭深度分布であ

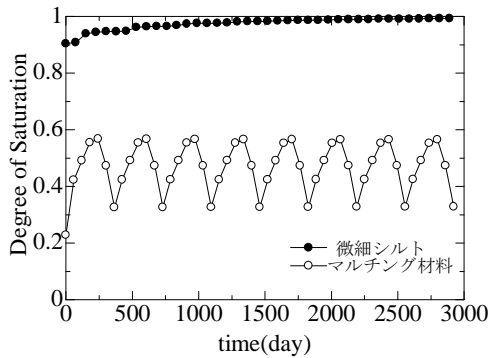


図-17 地表面要素の飽和度変化 (マルチング)

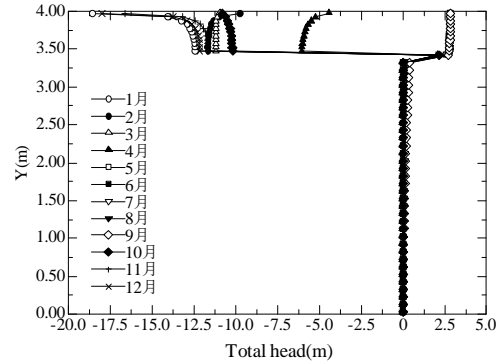


図-20 月毎の全水頭深度分布化 (改良型マルチング)

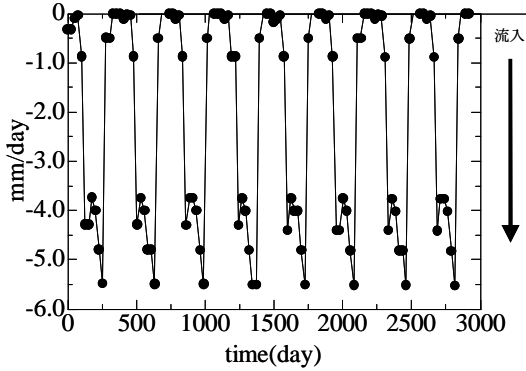


図-18 マルチング時の水収支

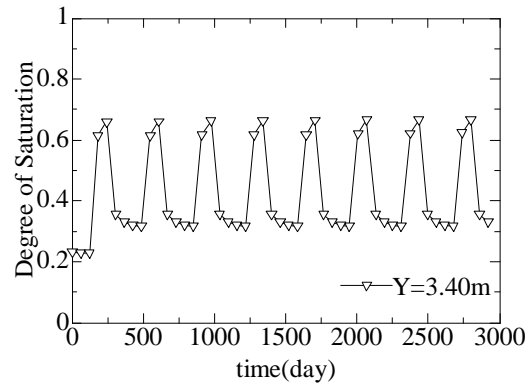


図-21 マルチング層の飽和度変化

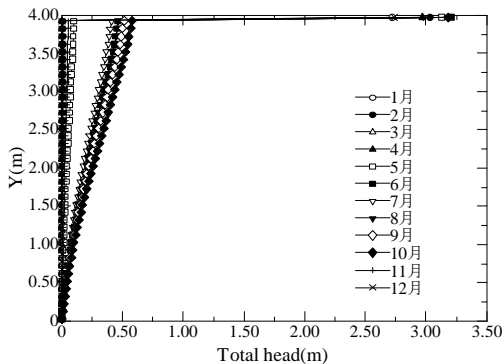


図-19 月毎の全水頭深度分布 (マルチング)

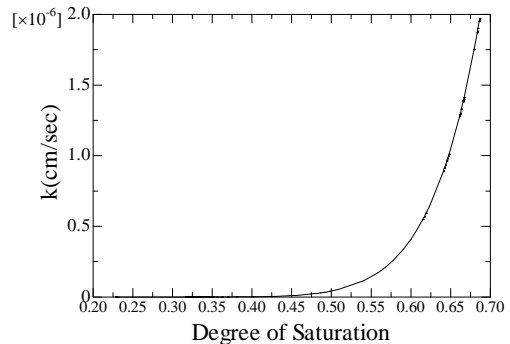


図-22 マルチング材の不飽和透水係数

る。マルチング材の層を境に、上下の水の流れが断たれているのが分かる。マルチング層上部では、乾湿の影響を受け大きく水頭が変化している。これは、不飽和透水係数が有効飽和度に依存することが原因である。図-21 は、マルチング層の飽和度変化であるが、地表面に設定する場合ほどではないものの、飽和度は低く保たれている。図-22 は、マルチング材の不飽和透水係数～飽和度関係であるが、乾季にはかなり透水係数が低下することが分かる。つまり、改良型マルチングの場合は、不飽和透水係数の低下により水の流れを断つことで塩害抑制に貢献することが分かる。

5 塩害地盤の浄化再生手法の検討

前章まで、塩害のメカニズム、その抑制方法の検討を行ったが、すでに塩害によって失われた土地は多い。ここでは、そのように既に塩害を受けた地盤の浄化再生手法を検討する。

5.1 フラッシング

水収支による流下方向の水量を増加させれば、上昇した塩分を押し下げることが可能である。このように浄化目的で人工的に給水することをフラッシングと呼ぶ(図-23)。ここでは、すでに塩害を生じた地盤(塩類集積シミュレーションで8年経過)を想定し、降雨・蒸発の影響を考慮せず、 $10\text{l/m}^2\cdot\text{day}$ (10mm/day の降雨に相当)の水を定期的に与えた。図-24 にフラッシングを開始してからの濃度比分布を示す。塩分が流下し、地表面から浄化されていく様子が伺える。図-25 は、深度毎の濃度比変化である。地表面に析出していた塩分を溶解しながらの浄化なので、高濃度の領域が徐々に下方に移動してい

くのが分かる。フラッシング開始から180日で地下水位近くの地盤までのフラッシングが完了することから、この地盤は気候条件を考慮に入れなければ、 $10\text{l/m}^2\cdot\text{day}\times 180\text{day}=1800\text{l/m}^2$ の水によって地盤の再生が可能であると言える。

5.2 使用水量に制限を設けた給水頻度について

大量の水をフラッシングに利用すれば地盤の再生が可能なのは推察できる。ここでは、気候条件を考慮に入れ、年間の利用可能水量を 900l/m^2 と制限し、シミュレーションによって最適な給水頻度を模索する。

まず、フラッシングに使用できる水の量 900l/m^2 を特定の時期に集中的に使用するケース(ここでは1年の最初の31日間に行った)(図-26)と、その量を等配し毎日定量的に使用するケース(図-27)で比較を行った。図から、集中してフラッシングを行うより、その量を分散させて定期的に行う方が、季節による濃度上昇の影響が少なく、効果が高いことが伺える。更にフラッシングを分散させる時期を、乾季に限定した(図-28)ところ、最も効果があった。

これらのことから一定量の水をフラッシングに用いることができる場合、可能蒸発量に比べ降雨の割合が少ない乾季に給水を行い、地盤内に常に鉛直下向きに動水勾配を発生させることが最も望ましいと言える。

6 まとめ

物質輸送問題を考慮した不飽和土/水連成有限要素解析により、塩類集積シミュレーションを行った。また、保水性の異なる地盤材料の組み合わせによる

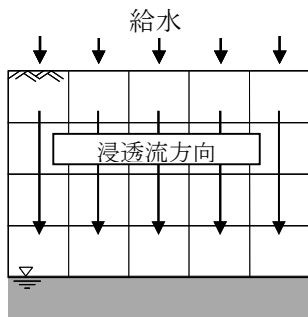


図-23 フラッシングの概念

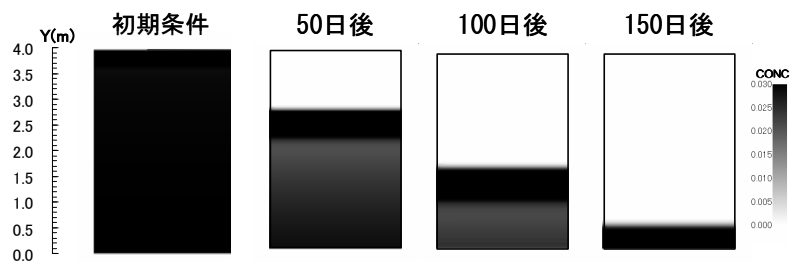


図-24 フラッシング時の濃度比分布

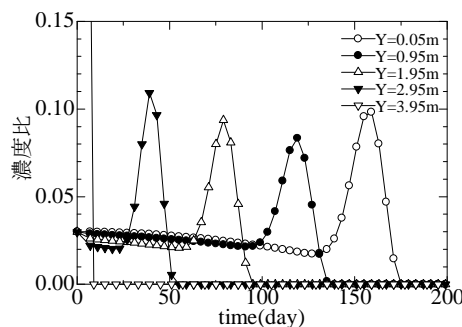


図-25 フラッシング時の濃度比変化

塩害抑制効果のメカニズムを明らかにするとともに、塩害地盤の浄化再生のためのフラッシング手法の検討を行った。ここでは、地盤を連続体としてモデル化しており、ミクロなスケールでの間隙構造が溶解物質の移動や吸脱着に及ぼす影響等は考慮していない。今後、モデルの精緻化も含めて、実際の材料パラメータ、境界条件等を詳細に調査し、定量的な予測が行えるよう、シミュレーション手法を進展させ、塩害メカニズム解明、対策の提案に貢献したいと考える。

参考文献

- 1) 藤川和彦, 飯塚敦, 河井克之, ティラボン・ピパットパンサー: 物質移動を考慮した不飽和土/水連成問題の数値モデルと有限要素解析手法, 応用力学論文集, Vol.9, pp.377-384, 2006.
- 2) Karube, D. and K. Kawai: The role of pore water in the mechanical behavior of unsaturated soils, *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol.19, No.3, pp.211-241, 2001.
- 3) 飯塚敦, 本田道識, 西田博文, 河井克之, 軽部大

- 蔵: 間隙水分布の違いを考慮した不飽和土の土/水連成解析, 土木学会論文集, No.659/III-52, pp.165-178, 2000.
- 4) 大野進太郎, 河井克之, 橋伸也: 有効飽和度を剛性に関する状態量とした不飽和土の弾塑性構成モデル, 土木学会論文集, Vol.63/No.4, pp.1132-1141, 2007.
- 5) 杉井俊夫, 宇野尚雄: 新しい水分特性曲線のモデル化について, 土木学会第50回年次学術講演会概要集, pp.130-131, 1995.
- 6) 河井克之, 汪偉川, 飯塚敦: 水分特性曲線ヒステリシスの表現と不飽和土の応力変化, 応用力学論文集, Vol.5, pp.777-784, 2002.
- 7) Mualem, Y.: A conceptual model of hysteresis, *Water Resources Research*, Vol.10, No.3, pp.514-520, 1974.

(2009年4月9日 受付)

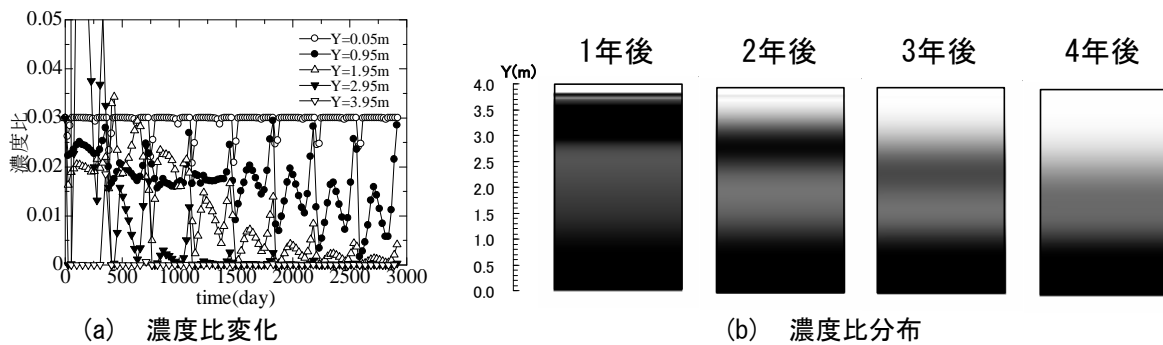


図-26 集中的に給水した場合の解析結果

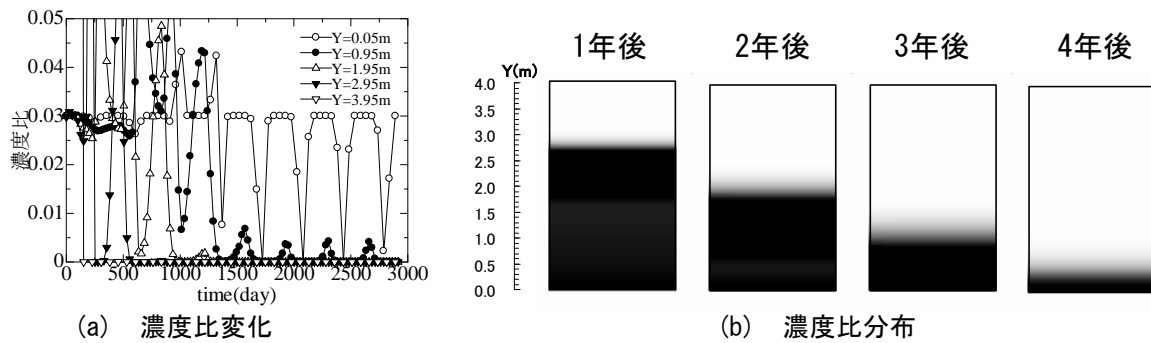


図-27 均等に分散させて給水した場合の解析結果

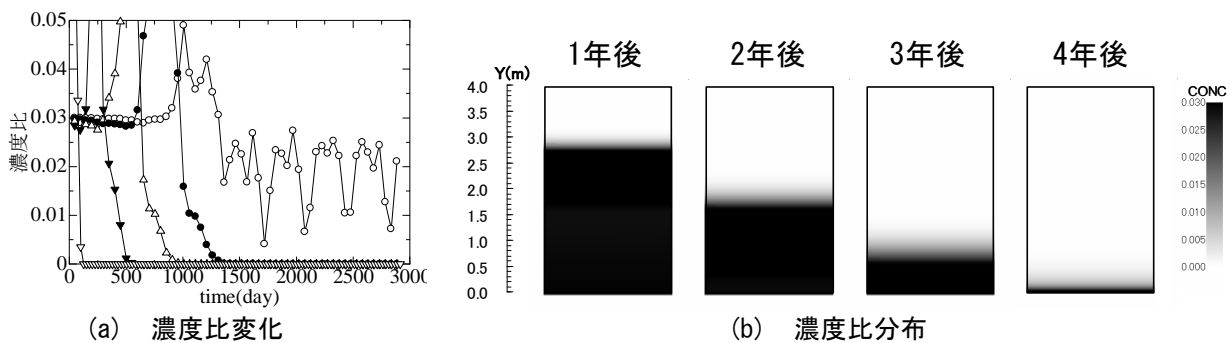


図-28 乾季に給水した場合の解析結果